

**Vliv doválcovacích podmínek na vlastnosti tlustých  
ocelových plechů**

Influence of the finish-rolling parameters on the properties  
of heavy steel plates

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování panu Ing. Stanislavovi Ruzovi, Ph.D. za jeho cenné rady, připomínky, trpělivost a ochotu při vedení bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá vlivem doválcovací teploty na mechanické vlastnosti a strukturu plechů při normalizačním válcování plechů jakosti S355J2+N. V rámci práce byl proveden experiment simulace poslední fáze válcování z tloušťky 80 mm na finální tloušťku 40 mm za rozdílných doválcovacích teplot. Byly sledovány parametry: mez kluzu, mez pevnosti a tažnost dle normy ČSN EN 10025-2. Dále byla vyhodnocena tvrdost, mikrostruktura, velikost feritického zrna a podíl feritu – perlitu. Hlavním záměrem práce bylo určit vliv doválcovacích teplot na vlastnosti tlustých plechů zvláště meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti pro zajištění dostatečné rezervy těchto vlastností oproti výše uvedené normě ve výrobním procesu na válcovně Vítkovice Steel, a.s. trati 3,5m Kvarto.

Klíčová slova:

Normalizační válcování, tlustý plech, mechanické zkoušky, mikrostruktura

## **Abstract**

The bachelor thesis deals with the influence of the rolling temperature on the mechanical properties and structure of plates during the normalization rolling of plate grades S355J2 + N. Within the work, an experiment was performed to simulate the last phase of rolling from a thickness of 80 mm to a final thickness of 40 mm at different finishing temperatures. The observed parameters were yield strength, tensile strength and ductility according to the ČSN EN 10025-2 standard. Furthermore, the hardness, microstructure, size of the ferritic grain and the proportion of ferrite - perlite were evaluated. The main purpose of the work was to determine the effect of rolling temperatures on the properties of thick plates, especially yield strength, yield strength and ductility to ensure a sufficient reserve of these properties compared to the above-mentioned standard in the production process at the four-high rolling mill 3,5m in Vítkovice Steel, a.s.

Key words:

Normalizing rolling, thick plate, mechanical tests, microstructure

# Obsah

1	Úvod.....	1
2	Teoretická část.....	2
2.1	Válcování .....	2
2.2	Válcování tlustých plechů.....	3
2.2.1	Sortiment tlustých plechů.....	3
2.2.2	Válcovací tratě a jejich uspořádání .....	4
2.2.3	Výrobní zařízení.....	4
2.2.4	Způsoby výroby tlustých plechů .....	9
2.3	Řízené válcování.....	12
2.4	Normalizační válcování .....	15
2.5	Společnost Vítkovice Steel, a.s. ....	16
2.5.1	Válcovna 3,5 Kvarto .....	17
3	Experimentální část .....	25
3.1	Cíl experimentální práce .....	25
3.2	Polospojité laboratorní válcovna .....	25
3.3	Popis experimentu (simulace).....	26
3.4	Metalografické analýzy.....	31
3.5	Mechanické hodnoty .....	35
3.6	Měření tvrdosti vývalků.....	37
4	Závěr.....	38
5	Seznam zdrojů a použité literatury.....	39

# 1 Úvod

Závěrečná práce se zabývá problematikou vlivu doválcovacích podmínek na vlastnosti tlustých ocelových plechů. Obecně je technologie válcování jednou z nejvíce využívaných technologií pro výrobu hutních produktů. Mezi tyto produkty patří například ocelové plechy, štetovnice, kolejnice, různé typy profilů a podobně.

V současnosti jsou pokládány stále vyšší nároky na mechanické a fyzikální vlastnosti ocelových produktů. Z tohoto důvodu bylo zavedeno řízené válcování a ochlazování, termomechanické zpracování a další. Rozhodujícím faktorem udržitelnosti konkurenceschopnosti jsou tak výrobní náklady.

V posledních letech je trendem ve výrobě hutních produktů celosvětově přechod od dodavatele produktů komoditního charakteru k produktům s vyšší hodnotou a k technologickému partnerství. Tato skutečnost se v České republice projevuje zejména ve vztahu k automobilovému průmyslu. Výroba v České republice je více než z 90 % tvořena třemi dominantními společnostmi – Liberty Ostrava, a.s., Třinecké železárny, a.s. a Vítkovice Steel, a.s. Pro tuto závěrečnou práci byla vybrána společnost Vítkovice Steel, a. s.

Závěrečná práce se skládá z teoretické a praktické části. V teoretické části je pojednáváno o problematice válcování tlustých plechů. Jsou zde uvedeny způsoby, jakými se válcují tlusté plechy, jaké existují druhy válcovacích tratí a úpravářských zařízení.

V praktické části je popsáno provedení experimentu simulací válcování plechů tloušťky 40 mm se zaměřením na zjištění vlivu doválcovací teploty na mechanické vlastnosti plechů konstrukční oceli S355J2 dle EN 10025-2. Experiment fyzikální simulace válcování plechů tloušťky 40 mm je zaměřen na vliv doválcovací teploty.

## 2 Teoretická část

V teoretické části je vysvětlena problematika válcování, jsou popsány jednotlivé druhy válcování, dále pak válcování tlustých plechů, sortiment tlustých plechů, uspořádání válcovacích tratí, výrobní zařízení potřebné pro výrobu plechů a způsoby, jakými se vyrábějí tlusté plechy. Dále je vysvětleno řízené válcování a válcování normalizační.

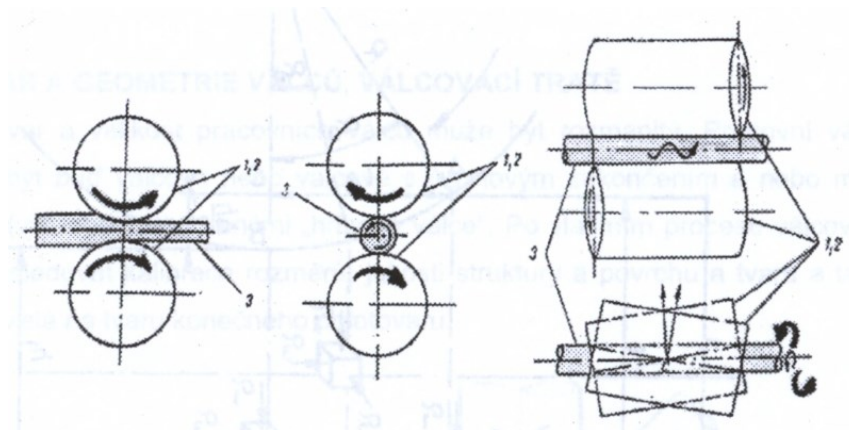
### 2.1 Válcování

Válcování se používá asi 500 let k výrobě plochých profilů a plechů. Pravděpodobně bylo poprvé vyvinuto v polovině 16. století pro výrobu zlatých a stříbrných pásů téměř konstantních rozměrů. Je to kontinuální proces, při kterém se tvářený materiál deformuje mezi otáčejícími se pracovními válci za působení převažujícího všestranného tlaku. U velkých komponentů to často vyžaduje značný příkon, který byl původně dodáván vodními mlýny, poté parní energií před příchodem moderních, elektricky poháněných a vysoce automatizovaných válcovacích stolic. Válcovaný materiál se mezi válci deformuje, tzn., že se snižuje jeho tloušťka, přičemž se materiál také prodlužuje a současně rozšiřuje a mění se i rychlost, kterou válcovaný materiál z válcovací stolice vystupuje. Mezera mezi pracovními válci je menší než vstupní rozměr materiálu. Válcování se provádí v posloupnosti válcovacích průchodů, během nichž se tlakové napětí může měnit od několika procent do 50 %, protože deformace se aplikuje pouze na část provalku mezi válci, tzn. na jeho relativně malý objem, čímž se také sníží zatížení. Vratná válcovací stolice se často používá pro první stupně válcování velkých profilů za tepla, jako jsou ingoty a bramy, za účelem co nejrychlejšího zmenšení jejich tloušťky a zabránění ochlazení. Válcování se provádí za tepla, ale i za studena. Válcování za tepla i za studena může vylepšením mikrostruktury vést k zásadnímu zlepšení vlastností materiálu. Ingoty lité pod tlakem se často vyznačují velkou velikostí zrn, výraznou pórovitostí a hrubými částicemi. Během válcování za tepla lze pórovitost uzavřít, zmenšit velikost zrna rekrytalizací a rozbít hrubé částice, což vede k silnějším a tvrdším slitinám. Výsledkem tohoto procesu je tzv. vývalek.

Proces válcování lze klasifikovat na základě různých použitých podmínek nebo metod ve válcování, kterými jsou:

- Teplota materiálu – válcování za tepla a válcování za studena.
- Tvar válcovaného produktu – válcování plochých profilů, dutých profilů a dalších.

- Směr válcování – podélné, příčné a šikmé válcování (viz obr. 1).
- Režim provozu válcovací stolice – nepřetržitý (jednosměrný) a zpětný chod válcování, kde je směr otáčení válců obrácen. [1-3].



Obrázek 1 Způsoby válcování [4]

## 2.2 Válcování tlustých plechů

Tlusté plechy lze definovat jako ploché vývalky. Tlustými plechy jsou z pravidla brány plechy s tloušťkou nad 3 mm, plechy do 3 mm jsou chápány jako tenké plechy.

### 2.2.1 Sortiment tlustých plechů

Tlusté plechy jsou z pravidla rozdělovány podle:

Rozměrů:

- Šířka,
- délka,
- tloušťka.

Jakosti: Požadavek na jakost závisí na tom, k čemu je plech určený.

- Stavby lodí,
- ocelové konstrukce,
- vysokopevnostní z mikrolegovaných ocelí na bázi C-Mn, nebo C-Mn-Mo s mikrolegujícími přísadami Nb, V, Ti, Zr, Al, a N,
- nejčastěji používanou ocelí pro výrobu tlustých plechů je uhlíková a nízkolegovaná ocel s obsahem C do 0,5 % a legovacích prvků.

Provedení:

- Hladké plechy se symetrickým průřezem,
- hladké plechy s nesymetrickým klínovým průřezem,
- plechy plátované legovanými ocelmi,
- podlahové plechy s výstupky. [5]

### 2.2.2 Válcovací tratě a jejich uspořádání

Válcovací tratě rozlišujeme na:

**Jednostolicové** – výhodou jednostolicových tratí jsou nižší investiční nároky, hodí se pro společnosti s nižšími ročními výkony a s proměnlivým sortimentem. Nevýhodou jednostolicových tratí je fakt, že předválcování a doválcování probíhá na stejných válcích a je tak vyšší riziko snížené jakosti povrchu plechů.

**Dvoustolicové** – pro dvoustolicové tratě je typická vyšší výkonnost, lepší povrchová jakost, stejnoměrnější tloušťka a lepší protváření jádrových částí.

**Polospojité a spojitě** – tento typ tratí omezuje boční odpad, ale také zvyšuje anizotropii mechanických vlastností. Brama musí projít odokujením a poté vstupuje do vratné stolice, kde probíhá předválcování. Doválcování poté probíhá na čtyřech a více stolicích kvarto. [5]

### 2.2.3 Výrobní zařízení

Každá trať musí být vybavena skladem pro příjem vsázky (bram), ve kterém probíhají prvotní úpravy bram (podélné nebo příčné dělení) a jsou zde skladovány bramy k dalšímu použití. Poté bramy míří do ohřívacích pecí, za ohřívacími pecemi prochází bramy přes odokujovač na válcovací stolici. Z válcovací stolice vychází plech, který dále míří přes okrajové nůžky a rovnací stroj na chladicí rošty. Po vychladnutí plechu dále míří na další úpravářská zařízení. [3]

**Ohřívací pece** – existují různé typy ohřívacích pecí, nejběžnější jsou kroková a narážecí. Narážecí pece fungují na principu vložení vsázky, přičemž tímto vložением do pece vypadne



ohřátý blok na straně druhé. Krokové pece mají ramena, kterými postupně vsázku uvnitř pece posunujeme. Moderní pece pracují na oboustranném ohřívání, jak shora, tak zespodu, dochází tak k rovnoměrnějšímu prohřátí vsázky. Výkonnost pecí je dána počtem pásem, které jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 1).

*Tabulka 1 Výkonost pecí [5]*

Počet pásem	Výkonost [t.h <sup>-1</sup> ]
2	do 20
3	20 až 100
5 až 6	do 200 až 220

Krokové pece jsou výkonnější než pece narážecí, další výhodou oproti pecím narážecím je fakt, že na vsázce nevznikají chladnější pruhy v místě styku se skluznicemi, třením o skluznice se také poškozuje povrch vsázky. Další výhodou mají při případné havárii, že u krokových pecí můžeme snadno vyprázdnit pec. Mají také méně nákladné opravy a údržbu. Nevýhodou krokových pecí jsou vyšší investiční a provozní náklady. Ohřívací pece jsou řízené počítačem a plně automatizovány. Dalším typem ohřívacích pecí jsou pece hlubinné, vhodné pro ingoty do hmotnosti 30 tun, mají vyšší tepelnou účinnost a jsou elektricky vytápěné. Používají se hlavně pro ohřev legovaných ocelí.

**Odstraňovače okují** – pro vysokou jakost povrchu plechu se ohřev vsázky reguluje tak, aby došlo k minimálnímu zokujení. Po ohřevu musí vsázka projít přes ostříkovací zařízení (odokujovač) s hydraulickým ostříkem. Dále dochází k ostříku přímo na válcovací stolici. Tlak vody je určen podle vlastností okují. Tlustší pórovité okuje uhlíkových ocelí jsou odstraňovány při tlaku okolo 14-16 MPa s měrným příkonem vody 2-3 g.cm<sup>-2</sup>. Tenčí pevně lpící okuje legovaných ocelí jsou odstraňovány vyšším tlakem 20-25 MPa při měrném příkonu vody 2 g.cm<sup>-2</sup>. Pro snížení efektu ochlazování se používá také tlaková pára. [5]

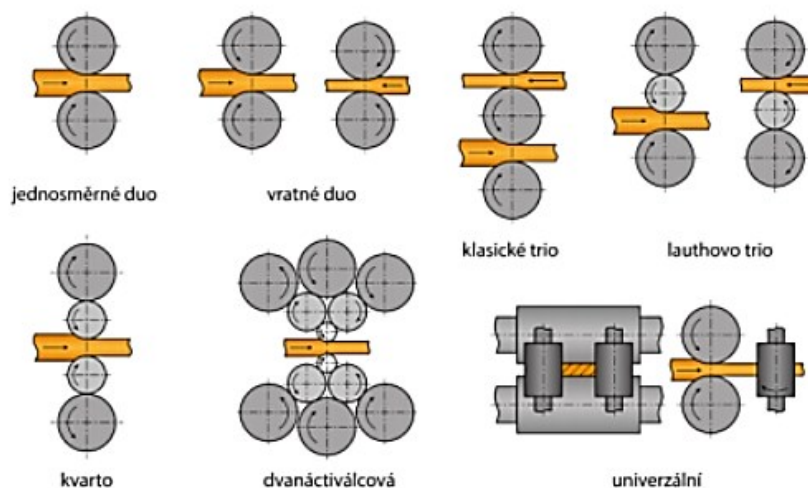
**Válcovací stolice** – válcovací stolice, viz obr. 2, dělíme podle využití a počtu válců na:

Válcovací stolice, u kterých jsou pouze pracovní válce:

- Duo (vodorovné, svislé, univerzální) – pro tyto stolice je typická menší výrobnost a zvýšená rozměrová a tvarová nepřesnost. Jsou na principu dvou válců, mezi nimiž dochází k válcování plechů.
- Další typy: Trio, Lauthovo trio.

Válcovací stolice, u kterých jsou nejen pracovní ale i opěrné válce:

- Kvarto – jsou určeny především pro výrobu přímo z ingotů nebo u tratí, kde převládá válcování tlustých plechů. Stolice kvarto je na principu dvou pracovních válců a dvou opěrných válců.
- Další typy: sexto, decento, dvanáctiválec, dvacetiválec. [6]



Obrázek 2 Typy válcovacích stolic [7]

Moderní válcovací stolice by měly splňovat tyto parametry:

- Vysoká tuhost stolice,
- vyšší energosilové zatížení stolice,
- větší výrobnost.

Díky vysoké tuhosti stolice je zajišťována minimální odchylka tloušťky po celé délce a šířce plechu. Je zajištěna potřebná rovinnost plechu a jeho tvarová přesnost. Vysoké tuhosti může být dosaženo několika způsoby:

- Zvětšením průměru pracovních válců na 1 100 – 1 200 mm,
- zvětšením průměru opěrných válců na 2 000 – 2 500 mm, nebo
- zvětšením průřezu stojiny stojanu až na 11 000 cm<sup>2</sup>.

Tuhost stolice charakterizuje válcovací síla, která vyvolá pružnou deformaci stolice 1 mm. Tvar válcovací mezery se u moderních tratí ovládá řízeným průhybem válců. V minulosti

byly stolice vybaveny hydraulickými válci zabudovanými v ložiskových tělesech, to ale způsobovalo komplikace při výměně válců a měření válcovacích sil. Pro úspěšné využití řízeného průhybu válců je podmínkou automatické řízení počítačem v rámci systému automatické regulace tloušťky. [5]

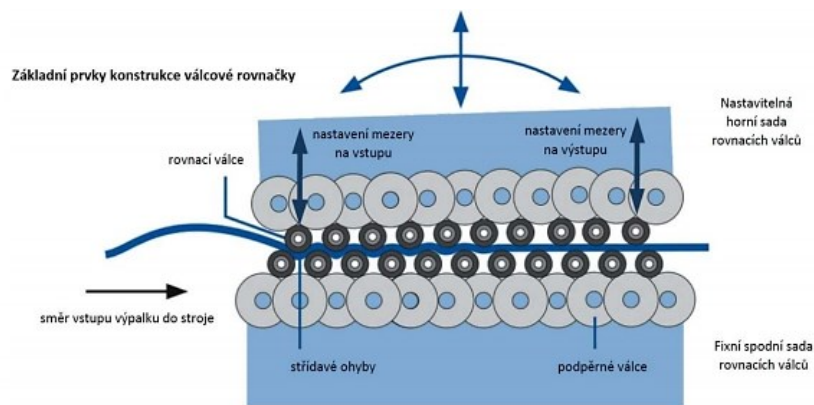
Pro vysokou výkonnost válcovací stolice a její vysokou přesnost rozměrů byly zajištěny dva systémy stavění:

- Elektromechanické hrubé stavění mezi průchody s rychlostí  $45-80 \text{ mm.s}^{-1}$ , zapojené do programového řízení válcovacího pochodu.
- Jemné hydraulické stavění během průchodu s rychlostí  $10-16 \text{ mm.s}^{-1}$ , se zrychlením  $500 \text{ mm.s}^{-1}$  a reakční dobou 30-40 ms pro změnu polohy o 0,1 mm. Přesnost nastavení polohy je 0,005 až 0,01 mm.

Pracovní válce mohou být litinové anebo z legované oceli, opěrné válce bývají zpravidla ocelolitinové. Při válcování je velmi důležité účinné chlazení válců, které zajistí jejich delší životnost. [5]

**Úpravenská zařízení** – mohou být uspořádána jednosměrně nebo víceliniově. Výhodou jednosměrného uspořádání je vyloučení příčné dopravy, která je zapotřebí u víceliniového uspořádání. Při manipulaci s plechy hrozí poškození povrchu plechu a také je víceliniové uspořádání složitější na organizaci. Nevýhodou jednosměrného uspořádání je naopak hrozba zastavení tratě při případné poruše na jednom ze zařízení. Mezi základní úpravářská zařízení patří rovnací stroj, chladicí rošty, okrajové a dělicí nůžky, pece na tepelné zpracování plechů a značící přístroj. [5]

Rovnací stroje – mohou být válečkové, viz Obr. 3, natahovací nebo v podobě rovnacího lisu. Rovnací stroje by měly být na trati situovány v blízkosti za válcovací stolicí, neboť je důležitá teplota při rovnání. Teplota rovnaného plechu by neměla být pod hranici  $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , hovoříme tak o rovnání plechů za tepla. Rovnání za studena zanechává v plechu zbytková pnutí.



Obrázek 3 Schéma válečkového rovnacího stroje [8]

Rovnání na natahovacím stroji se používá u tenkých plechů s vysokým požadavkem na povrchovou jakost a pro plechy s vysokou mezí kluzu. Plechy s tloušťkou nad 50 mm se rovnají v rovnacím lisu a rovnání se uskutečňuje za tepla. [5]

Chladicí rošty – slouží pro vychladnutí plechu, které je nezbytné pro další zpracování na dělicích a okrajových nůžkách. Teplota plechu pro zpracování nůžkami nesmí být vyšší než 100 °C. Vyšší teploty by zatěžovaly stříhání plechů zejména kvůli vyššímu opotřebení nožů a riziku vzniku trhlin na střížných hranách. Také pro zkoušení plechu ultrazvukem by neměla být teplota plechu vyšší než 80 °C. Chladicí rošty mohou být kotoučové nebo krokové. Krokové rošty zajišťují lepší povrchovou jakost plechů. [3], [5]

Dělicí a okrajové nůžky mají tři typy:

- Gilotinové nůžky s rovnými noži se sklonem horního nože 8° až 10°,
- gilotinové nůžky s kyvným pohybem horního nože a
- kotoučové nůžky.

Gilotinové nůžky s rovnými noži se využívají pro stříhání plechů do tloušťky 50 mm. Při použití těchto nůžek u vyšší tloušťky hrozí otláčení střížné hrany.

Gilotinové nůžky s kyvným pohybem horního nože zajišťují menší hloubku otlaků na hranách, menší spotřebu energie při stříhání a menší křivení odpadu. Tento typ nůžek se používá při stříhání plechů nad 20 mm.

Kotoučové nůžky se využívají u plechů s tloušťkou do 38 mm pro stříhání bočního odpadu.

Plech s tloušťkou nad 50 mm se omítají pálením. Pálení se ale používá i u tenkých plechů z důvodu nižších investičních nákladů.

K okrajování bočního odpadu se využívají lasery, které opticky zaměří boční stříhy s vazbou na funkci bočních ostríhovacích nůžek.

Pece na tepelné zpracování – mezi pece na tepelné zpracování plechů patří průběžné pece, ty mohou být krokové nebo válečkové. Krokové, jak už bylo řečeno výše, zajišťují vyšší jakost povrchu plechu. Dalším typem jsou pece komorové, vozové s výjezdnou nístějí, které se používají pro plechy větších tloušťek, tj. nad 100 mm. Při tepelném znovuzpracování plechů se zvyšují jejich jakostní vlastnosti. [3], [5]

## 2.2.4 Způsoby výroby tlustých plechů

Rozlišujeme válcování plechů z ingotů a válcování plechů z bram. Přímé válcování z ingotů probíhá výhradně na vratných tratích. Přímé válcování plechů z bram probíhá na vratných i spojitých tratích. Počet průchodů při předválcování je z pravidla 5-11 a na doválcování 5-9. [5]

Rozdíl mezi ingoty a bramami:

**Ingoty** – vyrábějí se litím roztavené oceli přímo z pánve do kokily. Při lití oceli dochází ke stříkání, čímž se ocel okysličuje a poté odstříknutá a okysličená ocel dopadá zpátky do kokily. Proto se později začala ocel lít zespodu, tento způsob je ale komplikovanější a nákladnější, protože vyžaduje lící soustavu kanálů. Odlévání ocele do ingotů se dnes používá jen výjimečně např. pro velké výkovky nebo jako vsázka pro výrobu bezešvých trubek.

**Bramy** – vyrábějí se kontilitím, tento způsob je rychlejší a méně nákladný než způsob, jakým se vyrábějí ingoty. Kontilití je proces, ve kterém se tekutá ocel lije do svislého, vodou chlazeného krystalizátoru, kde tuhne. V pásmu sekundárního chlazení pod krystalizátorem tuhne také střed takzvaného kontislitku, ten se ze svislé polohy ohýbá do vodorovné a pak se řeže na požadované délky. Kontilitím tak vzniká ocel rovnoměrných vlastností, přičemž tato technologie zároveň omezuje objem odpadu. Z kontilití vznikají bramy, bloky a sochory, které lze již přímo používat jako vstupní polotovary ve válcovnách. [9]

Přímé válcování plechů z ingotů:

1. Vyrovnání úkosu stěn ingotu několika průchody v podélném směru.

2. Otočení provalku o  $90^\circ$  okolo podélné osy ingotu a rozválcování šířky ingotu na požadovanou šířku provalku.
3. Otočení provalku o  $90^\circ$  a doválcování v podélném směru na požadovanou tloušťku plechu.

Válcování plechů z bramy:

**Podélné válcování** – podélná osa bramy (ingotu) odpovídá podélné ose plechu, tzn., že z délky bramy se válcuje délka plechu.

Při podélném válcování se používají tři postupy:

1.  $b_{br} < b_{pl} + b_0$  – boční odpad – nejpopulárnější způsob. V prvním stádiu přípravy se několika průchody  $i_p$  prodlouží délka bramy přibližně na délku těla válce, poté dojde k otočení o  $90^\circ$  a odválcuje se potřebná šířka provalku.  
 $b_{br} \geq b_{pl} + b_0$  – dalším otočení o  $90^\circ$  se válcuje v podélném směru na konečnou tloušťku.
2.  $b_{br} < b_{pl} + b_0$  – postup je stejný jako u prvního postupu, jen bez přípravných průchodů, protože výchozí délka bramy se blíží délce těla válce.
3.  $b_{br} \geq b_{pl} + b_0$  – válcuje se bez otočení přímo na konečnou tloušťku plechu.

kde:

$b_{br}, b_{pl}$  – šířka bramy, plechu

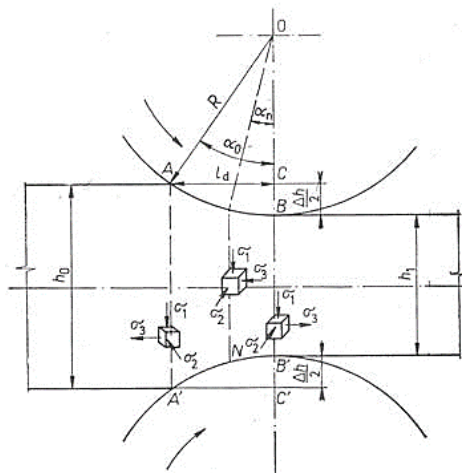
$b_{pr}$  – šířka provalku

$l_{br}, l_{pl}$  – délka bramy, plechu

$b_0$  – boční odpad plechu [5]

Osa válcovaného materiálu je kolmá k osám válců a převážná část deformace spadá do podélného směru. Plastická deformace neprobíhá najednou v celém objemu materiálu, ale jen v jeho relativně malé části, která se nazývá pásmo deformace. Při ustáleném válcování je geometrické pásmo omezeno vstupní a výstupní rovinou a také příslušnými oblouky otáčejících se válců. Skutečné pásmo deformace, ve kterém probíhá deformace materiálu, zasahuje do oblasti před a za geometrické pásmo deformace. Válcování je umožněno jen v důsledku tření mezi pracovními válci a materiálem. Koeficient tření je dán kvalitou povrchu pracovních válců a také měrným tlakem. Koeficient tření a měrný tlak způsobují vznik normálové a tečné síly. Válcování je omezeno limitní podmínkou, která vychází ze silového působení normálových a třecích sil v místě válcování, a to že součinitel tření musí být vyšší nebo roven polovině záběrového úhlu. Schéma deformace viz obrázky (Obrázek 4). [10]

$$\mu > \tan \frac{\alpha_0}{2} \quad (1)$$



Obrázek 4 Schéma deformace při válcování [4]

Vztah pro výpočet záběrového úhlu

$$\alpha_0 = \arccos \left( 1 - \frac{\Delta h}{2R} \right) \quad (2)$$

kde:

$$\Delta h = h_0 - h_1 \quad (3)$$

R – poloměr pracovního válce

$$\alpha_n = \frac{\alpha_0}{2} \left( 1 - \frac{\alpha_0}{2\mu} \right) \quad (4)$$

kde:

$\alpha_n$  – kritický úhel neutrální roviny

$\mu$  – součinitel tření

Výše uvedená rovnice je platná za předpokladu, že:

$$\mu < 0,4 \quad (5)$$

$$\alpha < 20^\circ \quad (6)$$

$$\frac{l_d}{h_s} > 3 \text{ až } 4 \quad (7)$$

$$h_s = \frac{h_0 + h_1}{2}$$

kde: (8)

$\frac{l_d}{h_s}$  – geometrický parametr pásma deformace (9)

Vztah pro výpočet průmětu záběrového oblouku

$$l_d = \sqrt{\Delta h \cdot R} ; \text{pro } R_1 = R_2 \quad (10)$$

$$l_d = \sqrt{\frac{2\Delta h \cdot R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}} ; \text{pro } R_1 \neq R_2 \quad (11)$$

**Příčné válcování** – podélná osa bramy (ingotu) se stává příčnou osou plechu, tzn., že z délky bramy se válcuje šířka plechu.

Postup při příčném válcování tlustých plechů:

1.  $l_{br} < b_{pl} + b_0$  – v prvním stádiu válcování se délka bramy proválcuje na potřebnou hodnotu šířky plechu.
2.  $l_{br} \geq b_{pl} + b_0$  – po otočení na  $90^\circ$  se válcuje na konečnou tloušťku plechu.

Mezi výhody příčného válcování patří zmenšení anizotropie mechanických vlastností. Zkrácení doby válcování tím, že odpadá jedno otáčení provalku o  $90^\circ$ . A vzniká menší protažení konců provalků, takže vzniká menší odpad. Mezi nedostatky příčného válcování řadíme možnost vzniku plošných necelistvostí, v důsledku toho, že se nekovové vměstky při válcování šíří plošně. Proto není vhodné tento postup aplikovat na válcování plechů z neuklidněných ocelí. [5]

## 2.3 Řízené válcování

Jedná se o nekonvenční způsob výroby tlustých plechů, který se zabývá způsobem řízení výrobních podmínek jako např. konstituce oceli, teplotně a časově deformačních parametrů nebo také způsobů tepelného zpracování. Hlavním účelem tohoto procesu je získání vhodného strukturního stavu, který zajišťuje zvýšení pevnostních vlastností při vyhovující houževnatosti a svařitelnosti (velikost zrn a subzrn, množství a disperznost precipitátů, způsob výskytu dalších složek a hustota dislokací). Rozhodujícím vlivem pro zvýšení pevnostních vlastností a snížení tranzitních teplot je zjemnění struktury. Ostatní jevy zvyšující pevnostní vlastnosti např. disperzní a dislokační zpevnění mají neblahý vliv na tranzitní teploty.



Hlavní vliv na zjemnění struktury má zpomalovací účinek mikrolegujících prvků především Nb. Z nerekrystalizovaného austenitu vzniká při fázové transformaci ferit z velkého množství nukleačních zárodků nejen na hranicích austenitických zrn, ale i na deformačních pásech. Působení mikrolegujících prvků je uvedeno v tabulce (Tabulka 2). [5]

Tabulka 2 Působení mikrolegujících prvků na průběh metalurgických procesů [11]

Ovlivnění	Mikrolegující prvky		
	Rozpuštěné v austenitu		V precipitátech
<b>Průběhu procesů</b>	Zpomalení difúzních procesů a snížení teplot fázových přeměn.	Zpomalení rekrytalizace.	Blokování pohybu hranic zrn a zpomalení pohybu dislokací.
<b>Struktury</b>	Zjemnění zrna a dislokační zpevnění.	Zjemnění zrna a tvorba textury.	Zjemnění zrna, precipitační zpevnění a ovlivnění tvaru sulfidů.

### Základní druhy řízeného válcování

- Doválcování ve spodní oblasti austenitu.
- Doválcování ve spodní oblasti austenitu s řízeným ochlazováním.
- Doválcování v oblasti dvoufázové struktury.
- Řízené válcování s kalením a popouštěním.
- Speciální způsoby (např. Sumitomo High Toughness). [11]

### Výrobní postup

Ohřev na válcovací teplotu – ohřevem je nutné rozpustit většinu karbidů a karbonitridů. Rozpustnost karbidů je popsána obecnou rovnicí:

$$\log K = \log(\%Me \cdot \%C) = -\frac{A}{T} + B \quad (12)$$

kde:

%Me – koncentrace mikrolegujícího prvku

%C – koncentrace karbidů

A, B – konstanty

T – teplota [°C]

Nejnižší teploty rozpouštění mají karbidy a nitridy vanadu do 1 050 °C (1 100 °C), následně pak karbonitridy niobu zejména dle obsahu niobu a uhlíku, které mají teplotu rozpouštění 1 100 až 1 200 °C. Nejvyšší teploty rozpouštění mají nitridy titanu, které se pohybují nad hranicí 1 300 °C.

První stadium válcování – první stadium probíhá v oblasti celkového průběhu statické rekrytalizace austenitu, přičemž musí zajistit rovnoměrnou a jemnou austenitickou strukturu. Pro perfektní průběh statické rekrytalizace se předpokládají dovalcovací teploty v rozsahu min. 1 000 až 950 °C s velikostí úběru nad 35-40 %.

Prodleva mezi prvním a druhým stadiem – mezistupeň, kterým se zajišťuje pokles teploty, který je nutný pro dosažení žádaných dovalcovacích teplot. Během tohoto mezistupně probíhá precipitace karbidů a karbonitridů mikrolegujících prvků. Pro růst austenitického zrna a průběh precipitace je účelné zrychlené ochlazování. Důležitým faktorem pro další průběh válcování je rovnoměrné rozložení teplot v průřezu plechu.

Druhé stadium válcování – válcování probíhá v podmínkách zcela zastavené dynamické i statické rekrytalizace. Při celkových deformacích nad 60 až 70 % dochází k nukleaci feritu na hranicích austenitických zrn i uvnitř deformačních pásů. Dovalcovací teploty jsou dále určovány podle požadovaných mechanických vlastností a velikostí válcovacích sil. Pro dosažení meze kluzu 450 až 500 MPa se volí dovalcovací teploty v rozsahu 700 až 750 °C.

Celková deformace tloušťky je ve druhém stadiu válcování minimálně 60 až 65 %. Jednotlivé úběry jsou cca. 25 %, nicméně vzhledem k rovinnosti plechů se v posledních průchodech snižují na 10 až 15 %. Deformační odpory v prvním a druhém stadiu jsou velmi rozdílné. V prvním stadiu působí na deformační odpor pouze mikrolegující prvky rozpuštěné v tuhém roztoku, naopak ve druhém stadiu zvyšuje deformační odpor průběh precipitace, zpomalení rekrytalizace a nízké dovalcovací teploty.

Požadované hodnoty válcovacích sil pro válcování určitých šířek plechů jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 3). [5]

Tabulka 3 Směrné požadované hodnoty válcovacích sil při řízeném válcování [5]

Šířka plechu [mm]	Válcovací síla [MN]
3 000	60-80
4 000	80-110
5 000	100-140

## 2.4 Normalizační válcování

Některé druhy plechů z konstrukční oceli se dodávají v normalizovaném stavu. V tomto případě se válcovaný produkt tzv. austenitizuje v peci a poté se nechá ochladit na vzduchu. Trvalá potřeba racionalizace procesu a snižování nákladů našla cestu pro výrobu normalizovaných plechů přímo válcováním. Tento proces se realizuje pomocí termomechanického zpracování tzv. normalizačního válcování, což je varianta řízeného válcování rekrytalizací. Ideální normalizační válcovací proces je charakterizován plnou rekrytalizací mezi válcováním za tepla a dokončovací teplotou, která se rovná austenitizační teplotě původně použité v peci pro tepelné zpracování. Konečným cílem je feriticko-perlitická mikrostruktura s jemnou a homogenní velikostí zrn. Používá se pro běžné C – Mn, mikrolegované a konstrukční feriticko-perlitické oceli, které již nejsou dále tepelně zpracovávány. Tímto způsobem válcování je nahrazeno normalizačním žíháním v peci. Z tohoto důvodu je nutné dodržení stanoveného rozmezí doválcovacích teplot. Tento proces probíhá v teplotní oblasti normalizačního žíhání, tzn., že finální tváření je realizováno ve spodní oblasti stabilního austenitu tedy 30-50 °C nad teplotou  $A_{c3}$ . Doválcovací teplota je závislá na jakosti oceli a tloušťce válcovaného vývalku a pohybuje se obvykle mezi 840-910 °C.

Kvalita normalizovaných plechů z žíhací pece je samozřejmě lepší než u plechů vyrobených normalizačním válcováním. Konvenčně normalizovaný plech je podroben opětovné austenitizaci a následnému pomalému ochlazení, což je další tepelné zpracování, které přispívá k minimalizaci centrální segregace a zjemnění mikrostruktury.

Normalizační válcování sestává z deformace materiálu ve dvou krocích, oba jsou realizovány nad teplotou rekrytalizace, následovanou chlazením statickým vzduchem. První krok se realizuje při vysoké teplotě do určité tloušťky válcovaného kusu, která se často nazývá „čekající tloušťka“ (nebo mezifázová tloušťka), když se nastaví doba zpoždění (přidržení) předtím, než kus přejde k druhému kroku válcování. Tato doba zpoždění podporuje určité

ochlazení, takže deformace začíná při specifické „restartovací“ teplotě, což umožňuje dosáhnout jak požadovaného snížení tloušťky plechu, tak správné teploty dokončení. Dokončovací válcovací průchody plechu jsou tedy řízeny tak, že se vyskytují v teplotním rozsahu nad  $A_{c3}$  a získávají požadovanou cílovou tloušťku plechu a dokončovací válcovací teplotu. To poskytuje po přirozeném ochlazení jemnozrnnou strukturu a vlastnosti materiálu spolu s dobrou rovinností, přímostí, kvalitou povrchu a geometrií, jakož i stabilitou válcování. [12], [13]

## 2.5 Společnost Vítkovice Steel, a.s.

Společnost VÍTKOVICE STEEL je přední evropský výrobce válcovaných produktů z oceli a největší výrobce ocelových plechů v ČR. Primární výrobní program sestává z tlustých plechů, tvarových výpalků a štetovnic. Plechy jsou vyráběny ve válcovně plechů a štetovnice jsou vyráběny ve válcovně těžkých profilů [14].

Společnost je jediným výrobcem štetovnic v ČR a jedním ze dvou výrobců v Evropské unii. Při produkci tlustých plechů těží ze silného tržního podílu na klíčovém domácím trhu. Kontrola kvality produktů probíhá ve vlastních akreditovaných zkušebních laboratořích, které disponují moderní zkušební technikou. Na Obr. 5 je zobrazen výrobní areál společnosti.

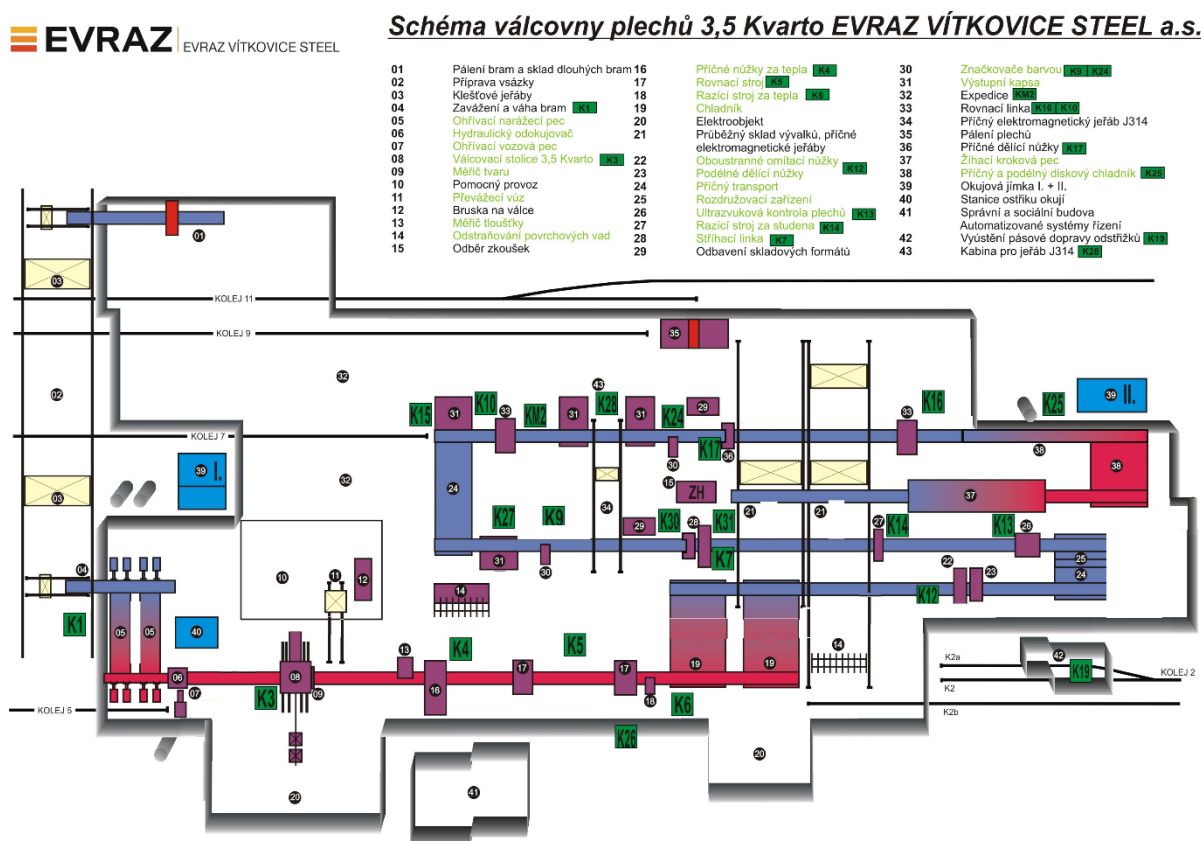


*Obrázek 5 Satelitní fotografie výrobního závodu [15]*

## 2.5.1 Válcovna 3,5 Kvarto

Válcovna plechů byla založena v roce 1971, její schéma je zobrazeno na Obr. 6. V roce 1999 prošla rozsáhlou modernizací, která umožnila výrazně zlepšit geometrii vyválcovaného plechu, povrchovou kvalitu a rozšířit vyráběný sortiment. Plechy jsou vyrobeny z kontinuálně odlévaných bram. Sortiment plechů je válcován v tloušťkách 5-100 mm popř. 200 mm a šířkách 1 000 - 3 200 mm.

### Přehled jednotlivých úseků a technického vybavení válcovny



Obrázek 6 Schéma válcovny 3,5 Kvarto [16]

Sázení do narážecí pece – připravář vsázky vytváří sázecí program s ohledem na tato hlediska:

- Hledisko válcování (pouze vzestupná nebo sestupná změna základních rozměrů bram).
- Hledisko ohřevu (stejně nebo podobné tloušťky a šířky bram, stejné skupiny ohřevu a teploty tažení).



- Hledisko plánování výroby (dodržení technologie ohřevu a válcování).

Sazeč sadí bramy na valník a kontroluje především jejich označení a hmotnost. Údaje a vlastnosti bramy musí být shodné s údaji uvedenými v systému řízení hutní výroby (SŘHV). Bramy s neshodnými vlastnostmi a údaji nemohou být nasazeny. Sázení probíhá natlačením do pecních řad tak, aby bylo docíleno, co nejmenších přechodů tloušťek bram a zároveň byl součet šířek bram přibližně stejný. Sázení a natlačení vsázky je zachyceno na obrázku (Obrázek 7).



*Obrázek 7 Sázení a natlačení bram do narážecí pece [16]*

Ohřev bram – bramy jsou ohřívány v narážecích pecích, které jsou řízeny velinářem popř. pekařem pomocí počítače z kabiny pecního velínu (poloautomaticky, automaticky) v případě potřeby manuálně přímo na pecích. Společnost vlastní dvě narážecí pece s označením NP2 a NP3.

#### *Narážecí pec NP2*

Pec je plně v automatickém režimu. V případě potřeby je velináři umožněno využít i ručního případně poloautomatického režimu. Ohřev je v automatickém režimu řízen programem Prometheus, který hlídá především minimální časy ohřevu a tuno-hodinový výkon pece. Při využití ručního nebo poloautomatického režimu je velinář povinen kromě splnění minimálních časů ohřevu hlídat také teplotu bram na konci každé zóny pomocí přednastavené křivky ohřevu. Teplotní tolerance vytažených bram by se pohybuje v rozsahu  $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , technologem je však povolena tolerance max.  $\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### *Narážecí pec NP3*

Pec je plně v automatickém režimu. V případě potřeby je velináři umožněno využít i ručního případně poloautomatického režimu. Ohřev je v automatickém režimu řízen programem Anvil, který hlídá minimální časy ohřevu, odchylku teplot bram od požadované křivky ohřevu a tuno-hodinový výkon pece. O provozním režimu pece rozhoduje velinář s ohledem na dodržení technologických parametrů a zajištění dostatečného výkonu pece. Technologie ohřevu bram je totožná s ohřevem v NP2.

Odokujení a válcování – odokujení má dvě fáze, a to primární a sekundární. Primární odokujení je prováděno v primárním odokujovači viz Obr. 8 (vlevo). Brama je po vytažení z pece přesunuta k odokujovači a zbavena okují, které je realizováno vodou o vysokém tlaku pomocí horních a spodních trysek. Mezera mezi tryskami a povrchem bramy je nastavena tak, aby bylo dosaženo maximálního tlaku (automatické nebo ruční nastavení). Sekundární odokujení pak probíhá přímo na válcovací stolici, přičemž je opět realizováno pomocí tlakové vody a slouží především k odstranění sekundárních okují, které vznikají válcovacím procesem a při tzv. čekacím čase na teplotu.

Válcovací program je dán především sázecími předpisy, které udávají pořadí sázení bram a ve většině případů i pořadí válcování. Sázečí předpis musí být sestaven tak, aby respektoval tzv. válcovací lichoběžník pro válcování normální kampaně nebo kampaně tenkých plechů (slabá kampaň). Válcování je prováděno na válcovací stolici 3,5 Kvarto viz Obr. 8 (vpravo) pomocí dvou pracovních a dvou opěrných válců vratným způsobem. Válcovací proces je řízen automaticky. Ruční manipulace je využívána pouze pro otáčení vývalků tedy při změně mezi jednotlivými fázemi válcování nebo při potřebě dodržet určité jakostní požadavky. Je dáno, že brama se musí odválcovat na vývalek postupnými úběry za dodržení daných rozměrů, povolených tolerancí a doválcovací teploty. Základní technické parametry válcovací stolice jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 4).

Fázové změny válcování:

- Egalizační (šířící),
- Prodlužovací.

Způsoby válcování:

*Konvenční válcování (KV)* – tento způsob válcování je používán pro běžné C-Mn, vysokouhlíkové, mikrolegované a legované oceli, které podléhají následnému tepelnému zpracování např. normalizačnímu žíhání, žíhání naměkko apod. Pro tento způsob je nutno dodržet maximální doválcovací teplotu.

*Normalizační válcování (ŽDT)* – používá se pro běžné C-Mn a mikrolegované oceli, které nepodléhají následnému tepelnému zpracování. Tento způsob válcování slouží jako náhrada normalizačního žíhání v peci. Důležité je dodržení stanoveného rozmezí doválcovacích teplot.

*Termomechanické válcování (TM)* – používá se pro běžné C-Mn oceli a mikrolegované oceli, které nepodléhají následnému tepelnému zpracování. Tento způsob spočívá v doválcování vývalku za nízké doválcovací teploty s omezenou velikostí úběrů a pauzou při čekání na teplotu ve stanovené tloušťce provalku. Dodržením těchto parametrů je dosaženo požadovaných mechanických vlastností. Důležité je dodržení stanoveného rozmezí doválcovacích teplot.

*REPRO válcování* – jedná se o způsob válcování, kterým je zlepšena rovnoběžnost bočních a koncových okrajů vývalků. Touto technikou je dosažena rovnoměrná šířka vývalku v podélném směru a rovnoměrná délka v příčném směru tedy pravoúhlost vývalku. [16]

Pro normalizační a termomechanické válcování jsou stanoveny tyto povolené odchylky:

- $\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$  od předepsané doválcovací teploty.





Obrázek 8 Odokujovač a válcovací stolice [16]

Tabulka 4 Základní technické parametry válcovací stolice [16]

<b>Výrobní kapacita</b>	tis. t/rok	755
<b>Délka válců</b>	mm	3 500
<b>Průměr pracovních válců</b>	mm	940 – 1 005
<b>Průměr opěrných válců</b>	mm	1 750 – 1 900
<b>Minimální tloušťka plechů</b>	mm	5
<b>Maximální tloušťka plechů</b>	mm	100 (200)
<b>Maximální šířka plechů</b>	mm	3 200
<b>Maximální délka vývalků</b>	mm	42 000
<b>Maximální válcovací síla</b>	MN	62

Stříhání za tepla – jedná se o zařízení, které slouží k dělení vývalků na menší části z důvodu dalšího zpracování, oddělování koncového odpadu a oddělování zkušebních vzorků z vývalků viz Obr. 9. Po proměření tloušťky na Eberline, je vývalek přesunut k teplým nůžkám, kde je odštířena hlavová a patní část vývalku. Vývalky jsou stříhány pouze do maximální tloušťky 40 mm. Operátor zařízení, popř. jiný pracovník pověřený mistrem válcovací tratě také ručně značí vývalky mastkem nebo vyražením.



*Obrázek 9 Tavná nůžka [16]*

Rovnání za tepla – rovnání vývalků je realizováno na dvou rovnacích strojích za tepla s označením RT13 a RT40 viz obrázek (Obrázek 10). Před rovnačkou RT13 je umístěn ofuk, který pomocí stlačeného vzduchu očistí vývalek od nečistot před samotným rovnáním. Při ponechání nečistot na vývalku by byly rovnáním nečistoty zatlačeny do vývalku, což by mohlo snížit jeho konečnou jakost. V závislosti na tloušťce vývalku, je rovnání prováděno oběma rovnačkami RT13 a RT40, a to v případě vývalků s tloušťkou do 13 mm nebo pouze rovnačkou RT40 v případě tloušťkou vývalků do 70 mm.



*Obrázek 10 Rovnačky RT13 a RT40 [16]*

Chlazení vývalků – vývalky jsou chlazeny na tzv. chladnících, čímž se rozumí kotoučová chladicí pole, která slouží k pozvolnému vychlazování vývalků na určitou teplotu vhodnou k dalšímu zpracování zpravidla cca. 90 °C. Jedná se o dvě chladicí pole (starý a nový chladník), přičemž na nový chladník je možné chladit vývalky s maximální délkou 29 700 mm. Zavážení vývalků na chladník a z chladníku je řízeno automaticky. V případě, že je nutné z technologického hlediska chladit vývalky zpomaleně, jsou vývalky ukládány do tzv. hrobů.

Kontrola vnitřních vad a následné dělení vývalků – jedná se o výrobní úsek, který slouží ke kontrole vnitřní homogenity vývalků pomocí nedestruktivní ultrazvukové zkoušky, dále dělení vývalků na okrajovací nůžce (ON), případně také podélnému dělení na podélné dělicí nůžce (PDN).

Vývalky jsou kontrolovány na ultrazvukové lince, viz Ob. 11 (vlevo), která sestává ze dvou pojízdných vozíků s cca. 70 ultrazvukovými sondami a vodního ostříku. Vodní ostřík slouží k nanesení vodní vrstvy na zkoušenou plochu vývalku, a to z důvodu správného prozvučení vývalku. Zkoušeny jsou pouze vývalky, u kterých je zkouška požadována zákazníkem, popř. z jiného patričního důvodu. Zkoušeny jsou vývalky do max. tloušťky 60 mm.

Po ultrazvukovém zkoušení jsou vývalky dále určeny ke zpracování na okrajovací nůžce popř. k podélnému dělení na PDN viz Obr. 11 (vpravo). Vývalek je umístěn patní částí pod čtecí kamerou ON k identifikaci ražení z RST (Razič za studena). Vývalek je dále stříhačem ustaven v prostoru elektromagnetických manipulátorů pomocí laserů do osy stříhání. Vývalek je dále postupně omítán případně podélně rozdělen. Stříhány jsou pouze vývalky do maximální tloušťky 40 mm, větší tloušťky jsou jen převezeny přes UZL (Ultrazvuková linka), ON k raziči za studena (RSS- Razič za studena).



*Obrázek 11 Ultrazvuková linka a ON + PDN [16]*



Tepelné zpracování vývalků – vývalky určené k tepelnému zpracování jsou ukládány do meziskladu dle tlouštěk, jakostí a požadovaného tepelného režimu a jsou zapsány do systému. Ukládání do hromad řídí pecář ve spolupráci s operátorem výrobního zařízení a jeřábníky. Pecář také připravuje materiál pro tepelné zpracování v krokové žíhací peci (KŽP), viz Obr. 12, dle požadovaného tepelného režimu, tlouštěk a jakostí a kontroluje správnost ražení sázených vývalků do KŽP, kvalitu povrchů a správnost dat na plechu se systémem SRHV. Teploty a další parametry jednotlivých zón v KŽP nastavuje a koriguje pecář ručně na pecním panelu v kabině.



*Obrázek 12 Kroková žíhací pec [16]*

Dělení vývalků, rovnání za studena a signování – v případě, že vývalky v předchozím zpracování neprocházejí žíháním, jsou dále zpracovávány na stříhací lince, viz Obr. 13 (vlevo). V první fázi jsou vývalky identifikovány a navedeny do stříhacího programu. Samotné stříhání je prováděno v automatickém režimu. U vývalků, když je to požadováno, probíhá také odebrání zkouškových pásů, které jsou následně pomocí dopravníku dopravovány na zkouškové hospodářství. Operátor mimo jiné provádí kontrolu a měření vývalků. Vyhovující vývalky, jsou dále převáženy pomocí jeřábu a valníku k označení barvou na signu viz Obr. 13 (vpravo) a shazovány do tzv. kapes.



*Obrázek 13 Stříhací linka a signovač [16]*

## 3 Experimentální část

### 3.1 Cíl experimentální práce

Cílem experimentální práce bylo provést fyzikální simulaci válcování plechů tloušťky 40 mm se zaměřením na vliv doválcovací teploty – celkem 4 variant po 3 vzorcích. Část laboratorních vývalků byla určena k mechanickému zkoušení, a zbylá část k metalografické analýze výsledných mikrostruktur.

### 3.2 Polospojité laboratorní válcovna

Laboratorní válcovna viz Obr. 14, na které byl experiment proveden, zároveň slouží k simulacím podmínek teplotně řízeného válcování s výsledky studia procesů intenzivního tváření za tepla. Je rozdělena do dvou pořadí – předválcovací a hotovní. Předválcovací pořadí tvoří jedna vratná duo stolice a hotovní pořadí je tvořeno čtyřmi stolicemi, ve kterých jsou provalky válcovány spojitým způsobem. V současné době umožňuje válcovat vratně na válcích o průměru až 350 mm, nebo vratně či spojitě na válcích s kalibrací plochý ovál-kruh.

#### Technické parametry

- Ohřev materiálu v plynové peci (max 1 300 °C) a v odporových pecích s hloubkou nístěje až 1,2 m a teplotou ohřevu až 1 800 °C, teplotně regulovatelný přihřev rozvalků pak zajišťuje průběžný indukční systém.
- Předválcovací vratná stolice umožňuje vyválcovat kulatinu 15,8 mm z nápichu kulatiny 55 mm, respektive 7,9 mm z nápichu 26 mm nebo kvadrát 14 mm z nápichu kvadrát 45 mm, dle použité sady válců.
- Spojité hotovní pořadí s uspořádáním 4 stolic H-V-H-V vychází z nápichu kulatiny 20 – 6,4 mm a je určeno pro válcování kruhových tyčí o průměru 12,3 – 4,2 mm při nejvyšší válcovací rychlosti 2,5 m/s.
- Hotový vývalek lze bezprostředně zakalit, nebo ochlazovat na vzduchu, zrychleně tlakovou vodou či zpomaleně v programovatelných žihacích pecích.
- Povrchové teploty jsou měřeny vysokorychlostními teplotními skenery (v rozsahu 300 – 1 400 °C).
- Řízení procesů, měření a ukládání dat je realizováno průmyslovými počítači PLC.



*Obrázek 14 Polospojitá laboratorní válcovna*

### **3.3 Popis experimentu (simulace)**

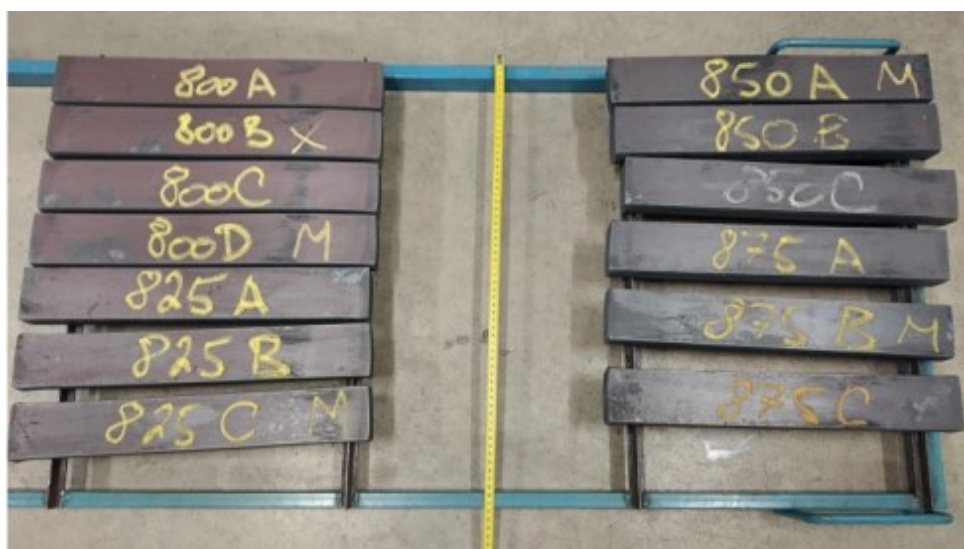
Simulace byly prováděny na laboratorní vratné válcovací stoličce typu duo s průměrem válců (resp. použité oblíny) 350 mm při nominální rychlosti otáčení válců  $15 \text{ min}^{-1}$ .

Pro účely práce bylo odválcováno celkem 12 hranolovitých vzorků z nízkouhlíkové konstrukční oceli jakosti S355J2+N dle EN10025-2 o rozměrech 60x60x300 mm. Ty byly ohřívány bez ochranné atmosféry v elektrickém odporových pecích s teplotou nístěje  $1\,000\text{ °C}$ , a to vždy po dobu min. 40 minut. Po vytažení z pece byl vzorek ocelovým kartáčem odokujen a umístěn pod teplotní skener. Podle průběžně zobrazovaných informací o povrchově teplotě volně chladnoucího vzorku byl volen správný okamžik pro zahájení válcování – většinou  $50\text{ °C}$  nad doválcovací teplotou (tzn. povrchovou teplotou rozvalku těsně před posledním průchodem). Doválcovací teplota byla přitom požadována ve 4 hladinách:  $800\text{ °C}$ ,  $825\text{ °C}$ ,  $850\text{ °C}$ ,  $875\text{ °C}$ . Během ochlazování před prvním průchodem byl vzorek otočen a znovu odokujen, aby se zajistilo jeho rovnoměrné ochlazování z obou stran.

Vlastní válcování na požadovanou tloušťku plechu cca 39,4 mm probíhalo na plocho čtyřmi výškovými úběry o nominální velikosti 10 % každý (tedy s mezitloušťkami 54,0 mm, 48,6 mm a 43,7 mm). Mírně odlišným nastavením válcovací mezery byl kompenzován různý skok válců při měnící se doválcovací teplotě. Dvojicí teplotních skenerů byla průběžně

kontrolována povrchová teplota rozvalku. Ten byl do válcovací mezery zaváděn střídavě mírně zešikma, aby se eliminovalo jeho prohýbání (vlnitost). Po každém průchodu byl rozvalek přetočen okolo podélné osy o  $180^\circ$ , a to opět z důvodu zajištění větší homogenity jeho teplotního pole. Ve všech případech byl bezprostředně po doválcování zařazen ještě 5. průchod s takovým nastavením válcovací mezery, aby prakticky nedošlo k výškovému úběru, ale jen k rovnání vzorku. Hotové vývalky byly ochlazovány volně na vzduchu (konkrétně na roštu konstruovaném s využitím starých pilových pásů) a označen vysokoteplotním popisovačem. Na místě se hodnotila rovinnost vývalků a ty poměrně nejvíce zvlněné se vybraly pro následné metalografické analýzy. Posuvným měřítkem se za tepla změřila tloušťka vývalku okolo 40 mm; po zchladnutí se tyto tloušťky orientačně pohybovaly v rozmezí 39,0 – 39,2 mm, což je v dobré shodě s teoretickou finální tloušťkou 39,4 mm.

Pro každou ze čtyř hladin doválcovací teploty byly při shodném úběrovém plánu odválcovány celkem 3 podařené vzorky, označené jako 800A, 800C, 800DM, 825A, 825B, 825CM, 850AM, 850B, 850C, 875A, 875BM a 875C viz Obr. 15. Číslo v kódu vždy koresponduje s nominální doválcovací teplotou, písmeno M značí vývalek určený pro metalografii. U vzorku 800BX se nepodařilo přesně určit doválcovací teplotu, proto byl ze souboru vyřazen.

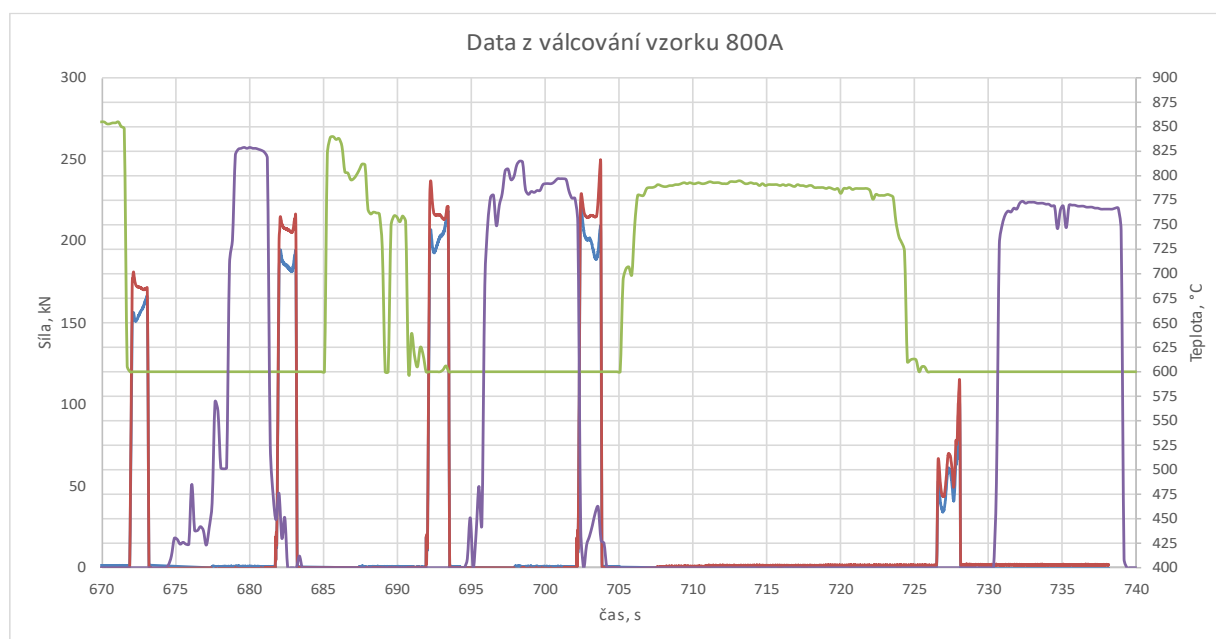


*Obrázek 15 Popsané vývalky po zchladnutí na roštu (pohled na půdorysné plochy)*

Pro každý z teplotních režimů válcování byl vybrán vzorek s nejspolehlivěji průběžně naměřenými teplotami a pro něj byl z počítačově registrovaných dat sestrojen graf zobrazující povrchovou teplotu (měřenou střídavě dvojicí skenerů na vstupní a výstupní straně válcovací stolice) a válcovací sílu v časovém intervalu okolo požadovaných čtyř válcovacích úběrů. Z obrázků (Obrázek 16–19) vyplývá dobrá přesnost při dosahování doválcovací teploty a rovněž významný nárůst válcovacích sil s poklesem teploty (detailněji viz níže). Registrované hodnoty válcovacích sil byly samozřejmě ovlivněny různým úhlem, pod kterým byly různé rozvalky při jednotlivých průchodech zaváděny mezi válce (tím byla vcelku náhodně ovlivněna styková plocha rozvalku s pracovními válci). V některých případech je zřejmý mírný nárůst teploty po doválcování, což lze vysvětlit přestupem tepla mezi středovými a povrchovými partiemi vývalků.

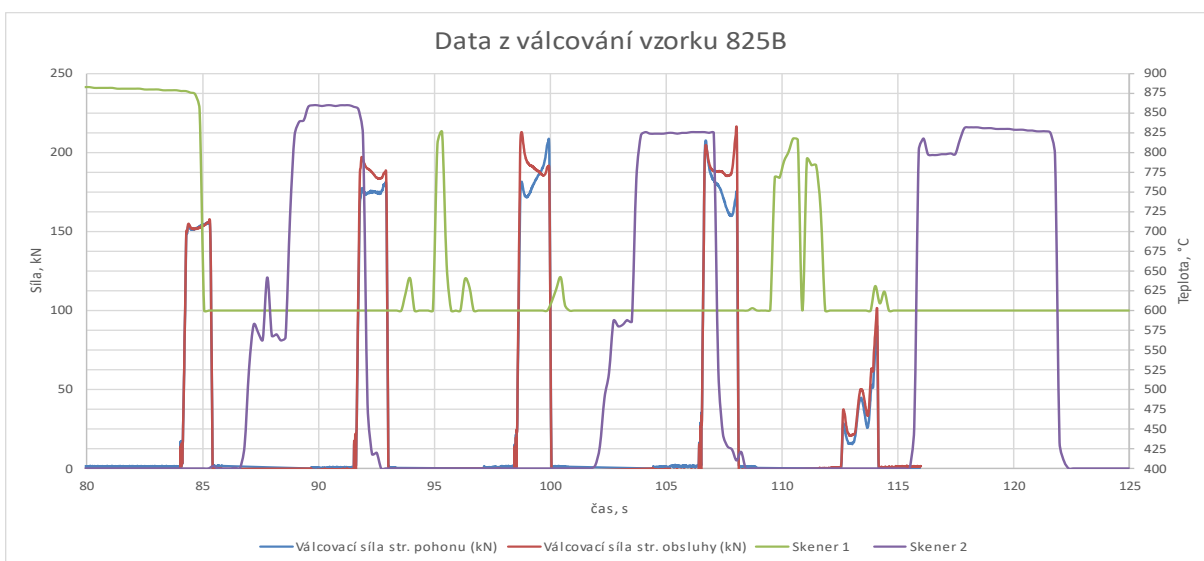
Je třeba upozornit na to, že měření teploty bylo komplikováno poměrně malou délkou válcovaného vzorku, která ne vždy stačila k umístění jeho reprezentativní centrální části pod příslušný teplotní skener.

Z obrázku (Obrázek 20) vyplývá, že při laboratorních simulacích došlo k nárůstu součtu čtyř válcovacích sil asi o 28 % při poklesu doválcovací teploty z 875 °C na 800 °C. Při tomto výpočtu nebyly brány v úvahu vyšší hodnoty sil odpovídající chladnějším koncům válcovaných vzorků.

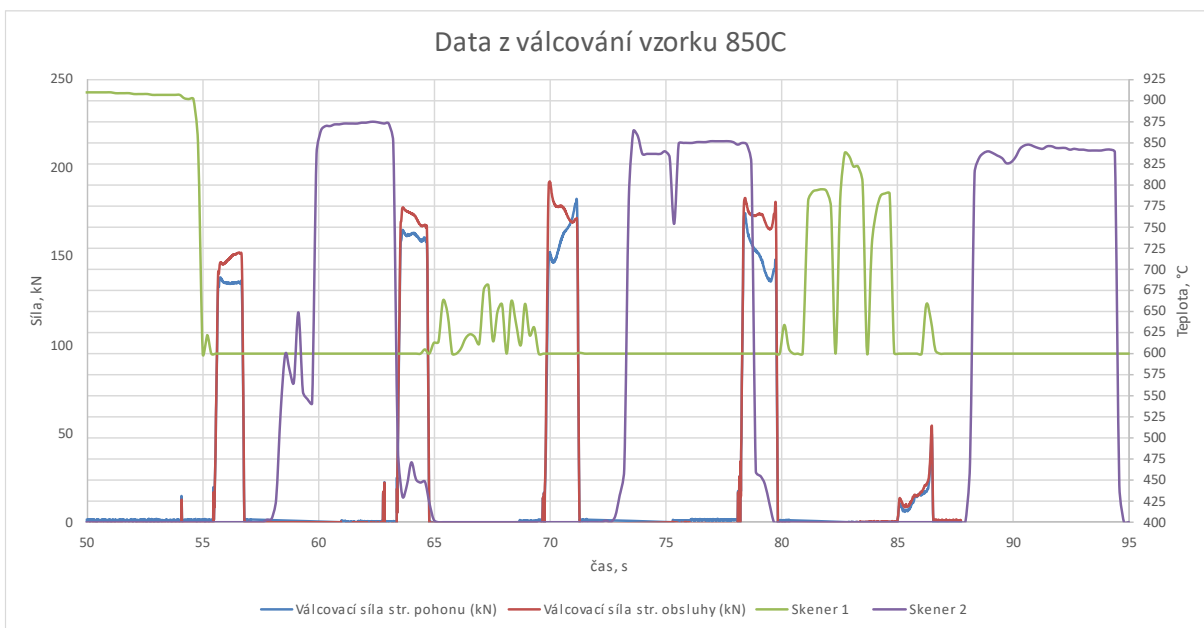


Obrázek 16 Povrchová teplota a válcovací síla naměřená při tváření vzorku 800A

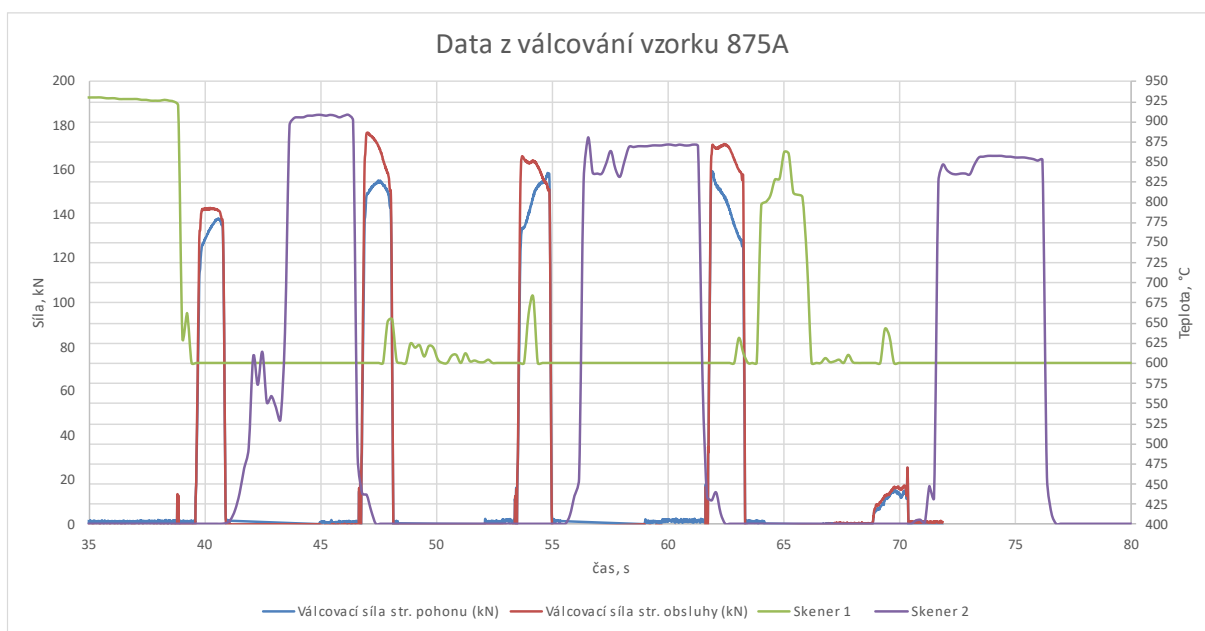




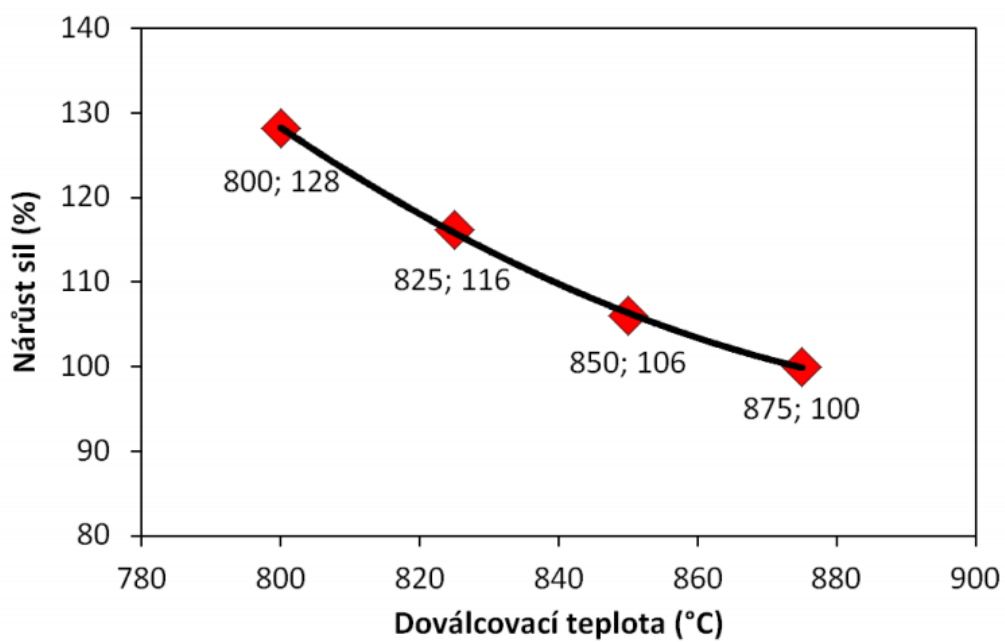
*Obrázek 17 Povrchová teplota a válcovací síla naměřená při tváření vzorku 825B*



*Obrázek 18 Povrchová teplota a válcovací síla naměřená při tváření vzorku 850C*



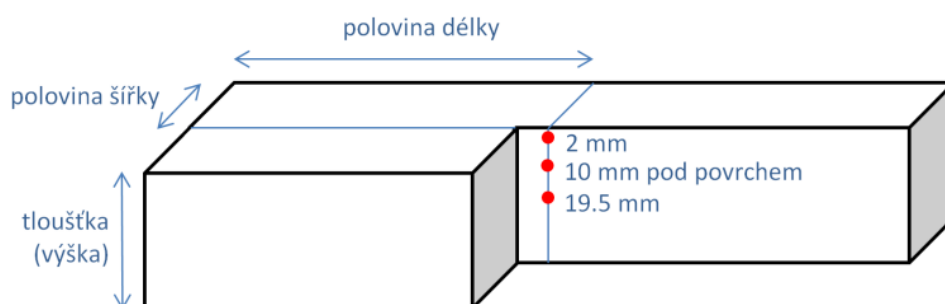
Obrázek 19 Povrchová teplota a válcovací síla naměřená při tváření vzorku 875A



Obrázek 20 Relativní nárůst válcovacích sil při poklesu doválcovací teploty (pro doválcovací teplotu 875 °C je součet válcovacích sil 100%)

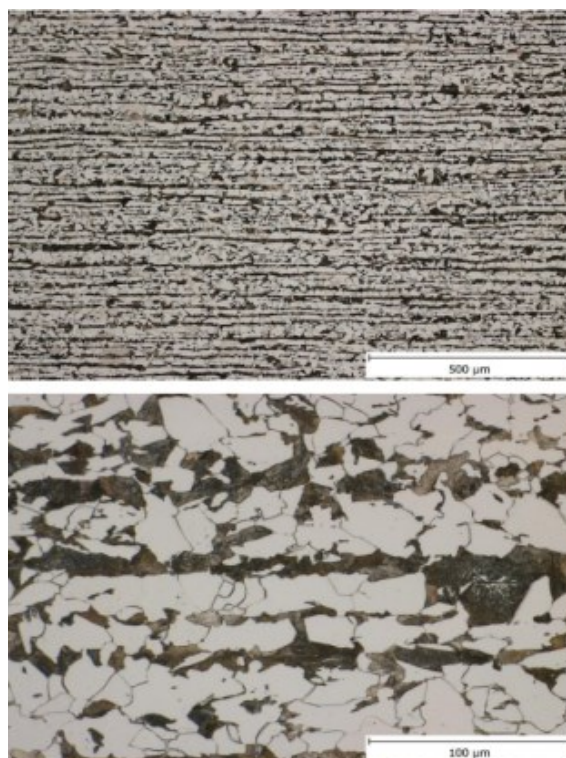
### 3.4 Metalografické analýzy

Z centrálních partií čtyř výše uvedených vývalků byly vyřezány vzorky pro metalografickou analýzu. Studován byl vždy podélně svislý řez, rovnoběžný se směrem válcování, a to v podpovrchové oblasti (tzn. 2 mm pod povrchem, na nějž působil horní pracovní válec při posledním průchodu), ve středové oblasti (tzn. 19,5 mm pod povrchem) a v mezilehlé oblasti 10 mm pod povrchem. Tyto lokality jsou schematicky znázorněny červenými body na obrázku (Obrázek 21).

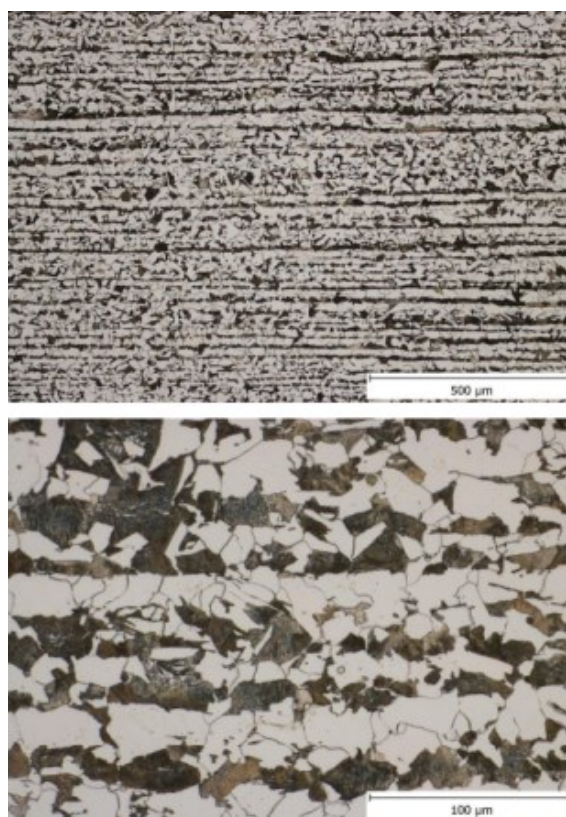


Obrázek 21 Vyznačení míst, v nichž byly prováděny metalografické analýzy vývalků

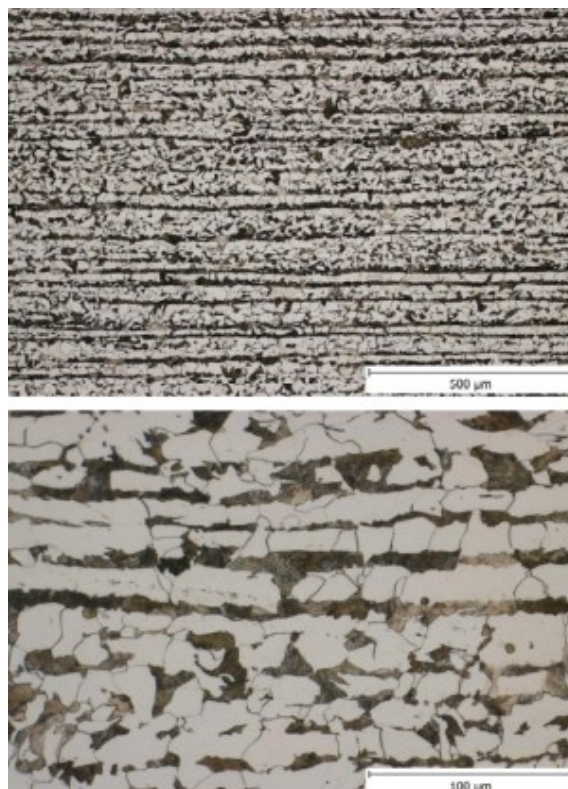
Na obrázcích (Obrázek 22–25) jsou uvedeny výsledné struktury vždy ve dvou hladinách zvětšení.



*Obrázek 22 Mikrostruktura po doválcování při nominální teplotě 800 °C v hloubce 2 mm pod povrchem*

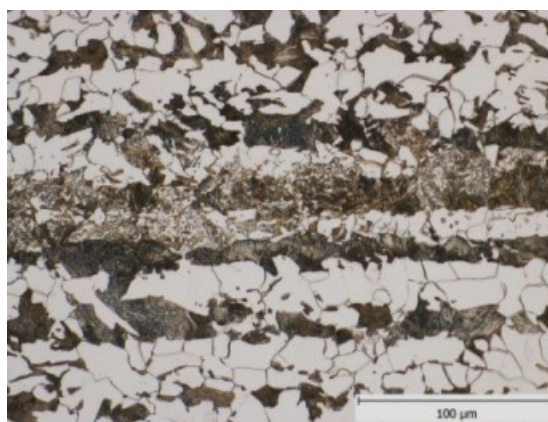


*Obrázek 23 Mikrostruktura po doválcování při nominální teplotě 800 °C, v hloubce 10 mm pod povrchem*



*Obrázek 24 Mikrostruktura po doválcování při nominální teplotě 800 °C, v hloubce 19,5 mm pod povrchem*

Struktura je v případě všech laboratorních vývalků kvalitativně obdobná – tvořena feritickými zrny různého tvaru i velikosti a útvary lamelárního perlitu, uspořádanými do více či méně výrazných řádků ve směru válcování. Zdá se, že významnější odlišnosti jsou dány lokálními segregacemi, výrazněji se vyskytujícími zejména ve středových oblastech vývalků (tedy v hloubce 19,5 mm pod povrchem).



*Obrázek 25 Mikrostruktura v oblasti výrazných segregací (nominální doválcovací teplota 825 °C, hloubka 19,5 mm pod povrchem)*

V tabulce (Tab. 5) jsou shrnuty výsledky metalografických analýz. Na základě počítačové analýzy obrazu v softwaru QuickPhoto Industrial byla vypočtena střední velikost feritického zrna a podíl rozlišitelných fázových složek, tedy feritu a perlitu. Interval spolehlivosti při měření velikosti zrna byl určován po úroveň spolehlivosti 95 %, a to vždy na základě 100 měření. Je zřejmé, že zjištěné hodnoty se v závislosti na nominální doválcovací teplotě i na hloubce pod horním povrchem vývalku liší jen nevýrazně. Průměrná velikost feritického zrna (počítaná ze všech měření u 4 vzorků a hladin hloubky pod povrchem) byla 16,0  $\mu\text{m}$  a průměrný podíl střední veličiny i pro jednotlivé podpovrchové hladiny a doválcovací teploty – viz Tabulka 6. Feritické zrno mírně hrubne směrem k osově partii vývalku, doválcovací teplota ve zvoleném intervalu je prakticky neovlivňuje. V případě podílu fázových složek nebyl zaznamenán žádný jednoznačný trend – to je však dáno i heterogenitou struktury a výskytem perlitických řádků s lokálně velmi se různící intenzitou.

V tabulce (Tabulka 6) jsou statisticky zpracovány i údaje o naměřené tvrdosti. Zatímco její průměrná hodnota odpovídá 154 HBW 30, nejnižší průměrné hodnoty 150 HBW 30 byly zaznamenány pro středové partie vývalků (v polovině jejich tloušťky) a pro nominální doválcovací teplotu 850 °C, což koresponduje s relativně největšími hodnotami velikosti feritického zrna. Z vyjádření vlivu nominální doválcovací teploty a hloubky pod horním povrchem na tvrdost je zřejmé, že nejslabších výsledků bylo dosaženo ve středové partii vzorku doválcovaného při teplotě 850 °C. Obecně však rozdíly ve strukturních vlastnostech a tvrdosti jednotlivých laboratorních vývalků nejsou nijak zásadní, což odpovídá zvolenému intervalu doválcovacích teplot. Lze předpokládat významnou roli případných středových segregací na sledované vlastnosti. Pro spolehlivější analýzy by byl zapotřebí větší počet vývalků.



Tabulka 5 Metalograficky určené strukturní parametry laboratorních vývalků

Doválcovací teplota (°C)	Hloubka pod povrchem (mm)	Velikost feritického zrna (μm)		Podíl feritu (%)	Podíl perlitu (%)
		Střední hodnota	Interval spolehlivosti		
800	2	16.0	1.7	61	39
	10	14.1	1.5	67	33
	19.5	17.7	2.2	64	36
825	2	14.3	1.4	66	34
	10	16.9	1.8	64	36
	19.5	14.0	1.5	57	43
850	2	17.1	2.1	60	40
	10	15.8	1.9	55	45
	19.5	17.4	1.9	60	40
875	2	14.6	1.7	58	42
	10	16.8	2.1	65	35
	19.5	17.3	1.9	61	39

Tabulka 6 Statistické vyhodnocení výsledných parametrů laboratorních vývalků

		Střední hodnoty		
		Velikost zrna (μm)	Podíl perlitu (%)	Tvrдость HBW 30
Hloubka pod povrchem (mm)	2	15.5	39	154
	10	15.9	37	157
	19.5	16.6	40	150
Nominální doválcovací teplota (°C)	800	15.9	36	156
	825	15.1	38	154
	850	16.8	42	150
	875	16.2	39	155
Všechny hodnoty		16.0	39	154

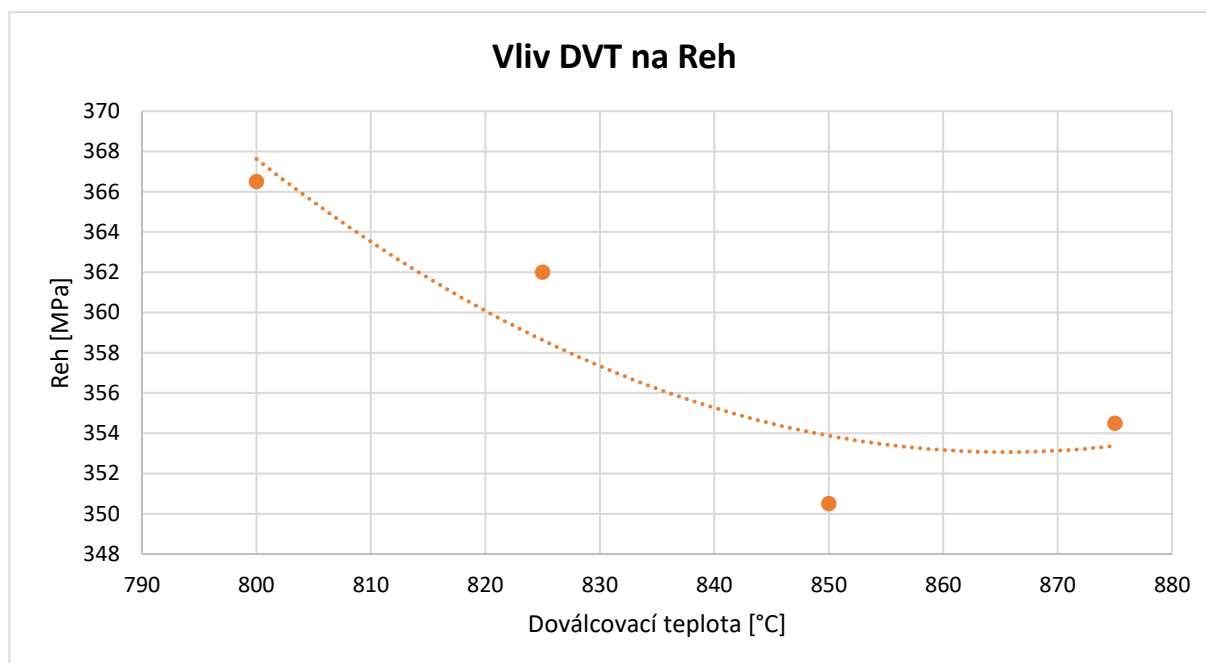
### 3.5 Mechanické hodnoty

Z 12 odválcovaných vzorků pro různé doválcovací teploty byly pro každou teplotu vybrány 2 vzorky pro provedení trhačí zkoušky. Cílem bylo ověřit, zda a jak změna doválcovací teploty ovlivňuje mechanické hodnoty mez kluzu, mez pevnosti a tažnost. Výsledky je možno vidět v tabulce (Tabulka 7).

Tabulka 7 Výsledky mechanických zkoušek z testovaných vzorků

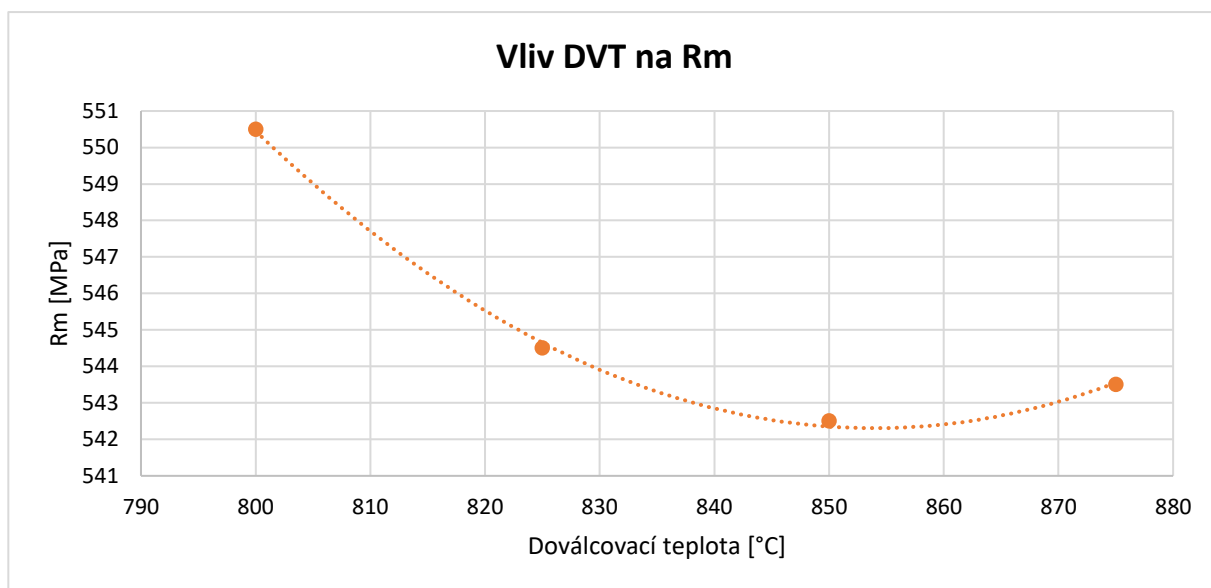
Označení vzorku	Re [MPa]	Rm [Mpa]	Re/Rm [-]	A [%]
800A	373	553	0,67	28,1
800C	360	548	0,66	29,8
825A	364	546	0,7	27,6
825B	360	543	0,63	28,8
850B	349	543	0,64	29,2
850C	352	542	0,65	27,3
875C	352	544	0,65	27,3
875A	357	543	0,66	27,6

Z dvou výsledků pro každou teplotu byla stanovena průměrná hodnota a tyto body byly následně vyneseny do bodového grafu. Z průběhu křivek pro mez kluzu a mez pevnosti lze vypořadovat, že s nárustem doválcovací teploty dochází k částečnému poklesu naměřených hodnot viz obrázek (Obrázek 26 a 27).



Obrázek 26 Závislost meze kluzu Reh na doválcovací teplotě





Obrázek 27 Závislost pevnosti Rm na doválcovací teplotě

### 3.6 Měření tvrdosti vývalků

V místech označených na obrázku (Obrázek 21) byla změřena tvrdost HBW 30, a to u těch čtyř vzorků, které byly zkoumány metalograficky. Kulička o průměru 2,5 mm byla vždy zatlačována silou 1 839 N do materiálu po dobu 10 s. U každého vzorku byly provedeny čtyři vpichy v každé hladině podpovrchové výšky. Dosažené výsledky (tedy střední hodnoty ze čtyř relevantních měření tvrdosti) uvádí Tab. 8. pohybující se v poměrně úzkém intervalu 141–159 HBW 30.

Tabulka 8 Střední hodnoty tvrdosti laboratorních vývalků v různých lokalitách

Doválcovací teplota (°C)	Hloubka pod povrchem (mm)	Tvrdost HBW 30 (-)
800	2	157
	10	158
	19.5	154
825	2	152
	10	159
	19.5	151
850	2	155
	10	154
	19.5	141
875	2	153
	10	157
	19.5	154

## 4 Závěr

V rámci práce bylo odválcováno 12 vzorků z materiálu S355J2+N dle EN10025-2 v tloušťce 60 mm při čtyřech hladinách doválcovacích teplot (800, 825, 850 a 875 °C) na vratné duo stolici. Všechny vzorky byly ohřáty v elektrické odporové peci s teplotou nístěje 1 000 °C a poté ochlazovány na vzduchu na teplotu cca o 50 °C vyšší, než byla požadovaná doválcovací teplota. Válcování se skládalo ze čtyř úběrů a finální tloušťka po odválcování byla 39,4 mm. Pro každou hladinu doválcovací teploty byly odválcovány tři vzorky, z nichž byl jeden vzorek určen pro stanovení mikrostruktury a dva vzorky pro provedení trhací zkoušky.

Z metalografických analýz a na základě počítačové analýzy v softwaru Quick Photo, bylo zjištěno, že hodnoty jako je velikost feritického zrna a podíl fázových složek se v závislosti na nominální doválcovací teplotě i na hloubce pod horním povrchem vývalku liší jen nevýrazně.

Dále je možno konstatovat, že feritické zrno mírně hrubne směrem k osově partii vývalku, ale doválcovací teplota ve zvoleném intervalu je prakticky neovlivňuje.

Z výsledků mechanických zkoušek pro různé doválcovací teploty lze vypořovat, že s nižší doválcovací teplotou dochází k nárůstu meze kluzu. Hodnota meze kluzu je jedním z kritických parametrů požadovaných normou EN 10025-2, a proto je i její mírné zvýšení vítáno. Z tohoto důvodu bude provedeno snížení doválcovací teploty v praktických podmínkách na vratné válcovací stolici 3,5 Kvarto a po získání dostatečného množství vzorků bude provedeno porovnání hodnot a závěrečné vyhodnocení.

## 5 Seznam zdrojů a použité literatury

- [1] Technologie II: Tváření kovů, zpracování plastů. *Technologie II* [online]. Liberec: Technická univerzita Liberec [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/02.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/02.htm)
- [2] VERLINDEN, Bert, Julian DRIVER, Indradev SAMAJDAR a Roger D. DOHERTY. *Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials*. Great Britain: Elsevier, 2007. ISBN 978-0-08-044497-0.
- [3] RAY, Siddhartha. *Principles and applications of metal rolling*. Delhi: Cambridge University Press, 2015. ISBN 978-1107076099.
- [4] ŽÍDEK, Milan, Vladimír DĚDEK a Boris SOMMER. *Tváření oceli*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. ISBN 978-80-7231-220-7.
- [5] KOLLEROVÁ, Mária. *Valcovanie: vysokoškolská učebnica pre skupinu študijných odborov hutníctvo*. Bratislava: Alfa, 1991. Edícia hutníckej literatúry (Alfa).
- [6] STANĚK, JIŘÍ. „Základní dělení válcovacích stolic,“ Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2016.
- [7] SIGMUND, Lukáš. *Válcování profilů*. Brno, 2016, 32 s. 1 příloha, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.
- [8] Schéma válcové rovnačky. In: *Stromac* [online]. Slaný: Stromac, c2021 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.stromac.cz/inpage/principy-valcove-rovnacky/>
- [9] Jak se vyrábí a zpracovává ocel. *Ocelářská unie* [online]. Ocelářská unie, c2021, 12.10.2018 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.ocelarskaunie.cz/jak-se-vyrabi-a-zpracovava-ocel/?highlight=bramy>
- [10] LIDMILA, Zdeněk a Emil SVOBODA. *Strojírenská technologie*. Brno: Univerzita obrany, 2006 [i.e. 2007]. ISBN 978-80-7231-220-7.
- [11] ŽÍDEK, Milan. *Metalurgická tvařitelnost ocelí za tepla a za studena*. Praha: Aleko, 1995. ISBN 80-853-4145-X.

- [12] GORNI, Antonio Augusto a Marcos Roberto Soares da SILVA. MICROSTRUCTURAL EVOLUTION OF THE NORMALIZING PLATE ROLLING OF NIOBIUM MICROALLOYED STEELS. In: *Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração* [online]. 2015, s. 72-76 [cit. 2021-04-04]. ISSN 2176-1515. Dostupné z: doi:10.4322/2176-1523.0750
- [13] *MACHINES, TECHNOLOGIES, MATERIALS: International virtual journal for science, technics and innovations for the industry* [online]. 5. Union of Mechanical Engineering, 2011 [cit. 2021-04-04]. ISSN 1313-0226. Dostupné z: [http://mechaning.com/journal/Archive/2011/6/102\\_Ratko%20Ilievski.pdf](http://mechaning.com/journal/Archive/2011/6/102_Ratko%20Ilievski.pdf)
- [14] *Vitkovice Steel: Ocelové základy Evropy od roku 1828* [online]. Ostrava: Vítkovice Steel, c2007-2021 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <http://www.vitkovicesteel.com/>
- [15] [www.mapy.cz](http://www.mapy.cz)
- [16] Interní data a informace společnosti Vitkovice steel a.s